

## بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیومی تقویت شده با نانو ذرات رس

رضا رشیدی میبدی\*  
دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه میبدی، میبدی، ایران،  
rashidi@meybod.ac.ir

محمد رضا بابائی زارچ  
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران، babaeeme@gmail.com

علی دهقان همدان  
فارغ التحصیل دکتری، شرکت تعاونی نانوالیاز کویر یزد، یزد، ایران، ali\_deh@yahoo.com

مسعود مهدی زاده رخی  
استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران، mmrokhi@shahroodut.ac.ir

### چکیده

کامپوزیت ماتریس آلومینیوم به دلیل بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی کاربردهای زیادی در صنایع نظامی و هوافضا دارد. در این تحقیق نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم "A357" تقویت شده با نانو ذرات رس با درصد‌های وزنی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ در شرایط مختلف نظیر سرعت های متفاوت سرد شدن مذاب و حالت آلیاز با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی اصلاح‌شده، ساخته شده اند. با انجام آزمایشات متعدد خواص مکانیکی آنها نظیر مدول یانگ، استحکام تسلیم، استحکام کششی نهایی، سختی، تغییر طول در هنگام تسلیم، تغییر طول در هنگام شکست، چقرمگی شکست و کارسختی تعیین و ارزیابی شده است. نتایج نشان داد که با افزودن نانو ذرات رس به آلومینیوم A357، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت به وجود آمده به مراتب بهتر از آلیاز پایه است. از میان نانوکامپوزیت‌های ساخته شده تحت شرایط مختلف بهترین خواص مکانیکی متعلق به نانوکامپوزیت تقویت‌شده با ذرات نانو رس با درصد وزنی ۱ می‌باشد. درمقایسه با آلیاز پایه، تنش تسلیم این نانوکامپوزیت ۴۲ درصد بهبود داشته است.

**واژه‌های کلیدی:** روش ریخته‌گری گردابی اصلاح شده، نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم، نانوذرات رس، خواص مکانیکی، نانو فناوری، بهبود خواص مکانیکی.

## Investigation of mechanical properties of reinforced aluminum-based nanocomposites with clay nanoparticles

**R. Rashidi Meybodi**  
**M. R. Babaei Zarch**  
**A. Dehghan Hamadan**  
**M. Mahdizadeh Rokhi**

Mechanical Engineering, Department, Meybod University, Meybod, Iran  
Mechanical Engineering, Department, Payame Noor University, Tehran, Iran  
Yazd Desert Nanoalloy Cooperative Company, Yazd, Iran  
Faculty of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

### Abstract

Aluminum matrix composite (AMC) has many applications in the military and aerospace industries due to its improved mechanical and physical properties. In this research, "A357" aluminum base nanocomposites reinforced with clay nanoparticles with weight percentages of 0.5, 1 and 1.5 in different conditions such as different cooling rates of the melt and alloy state made using stir casting method. Numerous tests have determined and evaluated their mechanical properties such as Young's modulus, yield strength, ultimate tensile strength, stiffness, change in length during yield, change in length during failure, fracture toughness and hardness. According to the results, it was found that by adding clay nanoparticles to A357 aluminum, the mechanical properties of the resulting nanocomposite are far better than the base alloy. Among the nanocomposites made under different conditions, the best mechanical properties belong to nanocomposites reinforced with nanoclay particles a weight percentage of 1. Compared to the base alloy, the yield stress of this nanocomposite has been improved by 42%.

**Keywords:** Modified Stir casting method, Aluminum-based nanocomposites, clay nanoparticles, Mechanical properties, Nano technology, Improvement of mechanical properties.

نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی وجود دارد، کم بودن ترشوندگی نانوذرات  
سرامیکی با مذاب زمینه فلزی است که باعث می‌شود ریخته‌گری به  
روش‌های متداول قابل انجام نباشد. ذرات ریز تمایل دارند تا خوشه‌ای  
شده و در یک جا جمع شوند که این امر باعث از بین رفتن یکنواختی  
توزیع در زمینه و عدم بهره برداری بهینه از پتانسیل تقویت‌کنندگی  
نانوذرات شود [۲]. عواملی نظیر اندازه نانوذرات، نوع ذرات و دمیدن گاز  
خشی در هنگام ریخته‌گری می‌تواند تاثیر قابل ملاحظه‌ای در فرآیند  
تولید داشته باشد [۱]. امروزه از نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم  
ساخته شده به واسطه بهبود خواص سختی و استحکام کششی، در  
صنایع مختلف از جمله هوافضا و خودرو که نسبت استحکام به وزن

### ۱- مقدمه

نانوکامپوزیت‌ها از جمله مواد مهندسی هستند که به دلیل خواص  
عالی مانند استحکام بالا و مقاومت در برابر خوردگی توجه دانشمندان  
را به خود جلب کرده اند. بهینه‌سازی فرآیند ساخت و استفاده دقیق از  
نانوذرات تقویت‌کننده برخی از رویکردهای بهبود خواص مکانیکی است.  
کامپوزیت‌های زمینه فلزی که با نانوذرات تقویت شده‌اند را  
نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی می‌گویند. هنگامی که ذرات بسیار ریز  
می‌شوند، اثر متقابل نانوذرات و نایجابی‌ها مهم‌تر شده و تاثیر زیادی  
روی مکانیزم‌های استحکام‌بخشی در کامپوزیت‌های می‌گذارند و خواص  
مکانیکی کامپوزیت را بهبود می‌بخشند [۱]. مشکل اصلی که در ساختن

\* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: rashidi@meybod.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۱/۰۸/۱۳

تاریخ پذیرش: ۰۱/۱۱/۰۳

اهمیت ویژه‌ای دارد استفاده می‌شود ولی بدلیل قیمت بالای آلومینیوم و خواص مکانیکی نامناسب آلیاژهای ریختگی آلومینیوم در دماهای بالا استفاده از آن را محدود می‌کند. از این رو محققین با توسعه کامپوزیت‌های مختلف زمینه آلومینیوم سعی در رفع عیب مذکور داشتند اما در این کامپوزیت‌ها اگر چه استحکام بالاتر از آلیاژ زمینه است ولی افزایش استحکام در کنار کاهش خواص دیگر همچون شکل پذیری دیده شده است [۳ و ۴]. با بروز فناوری نانو و ساخت نانوکامپوزیت‌های مختلف مشخص شد که نانوکامپوزیت‌های نسبت به آلیاژ پایه از استحکام ویژه بالاتر، شکل پذیری حداقل برابر با آلیاژ زمینه، چقرمگی بهتر، مقاومت به سایش و مقاومت به خزش عالی برخوردار می‌باشند [۵]. میزان افزایش استحکام در این نانوکامپوزیت‌های بسیار بیشتر از کامپوزیت‌های مرسوم تقویت شده با ذرات میکرونی است و در درصد‌های وزنی یا حجمی بسیار کم (کمتر از ۳٪) تقویت‌کننده بدست می‌آید [۶-۹]. با توجه به خواص جالب توجه نانوکامپوزیت‌های تیتانیم‌های بسیاری صورت گرفت تا فرآیند تولید نانوکامپوزیت‌ها تجاری شود. حاصل این کوشش‌ها به وجود آمدن روش‌های مختلف برای تولید نانوکامپوزیت‌های حجیم است.

با وجود حجم بسیار زیاد تحقیقات صورت گرفته در رابطه با ساخت نانوکامپوزیت‌های حجیم، تعداد روش‌های موجود برای تولید قطعات مهندسی پیچیده، بسیار اندک و انگشت شمار است. بسیاری از روش‌های کنونی تنها قابلیت تولید شکل‌های ساده را دارند و افزایش مقیاس برخی دیگر نیز بسیار مشکل است. در میان عوامل مختلف، مهمترین عوامل تجاری نشدن ساخت نانوکامپوزیت‌ها، فقدان یک روش اقتصادی برای تولید این مواد و قیمت بالای نانومواد است. از بین روش‌های موجود، فرآیندهای مبتنی بر انجماد از شانس بیشتری برای تولید مقرون به صرفه و انبوه قطعات مهندسی برخوردار می‌باشند [۴-۹]. تولید نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی با استفاده از فرآیندهای مبتنی بر انجماد در برگیرنده دو مرحله مهم است. مرحله اول، تهیه مخلوط مذاب - نانوذرات، به نحوی که نانوذرات به صورت ذرات مجزا و یکنواخت در مذاب معلق شده باشند و مرحله دوم، کنترل شرایط انجماد به نحوی که نانوذرات در زمینه نانوکامپوزیت نهایی به صورت یکنواخت پراکنده شده باشند، یا به عبارت دیگر فراهم کردن شرایط انجماد برای دربرگرفته شدن نانوذرات توسط جبهه انجماد، است. با بررسی منابع موجود مربوط به ساخت نانوکامپوزیت‌های مختلف با استفاده از روش‌های مبتنی بر انجماد مشخص می‌شود که مهم‌ترین و مشکل‌ترین مرحله برای ساخت نانوکامپوزیت‌ها، مرحله اول می‌باشد که علت آن، ترشوندگی ضعیف نانوذرات توسط مذاب فلزات و کافی نبودن نیروهای موجود برای شکستن خوشه‌ها و کلوخه‌های نانوذرات مربوط است. با توجه به تحقیقات صورت گرفته، مرحله دوم یعنی در بر گرفته شدن نانوذرات توسط جبهه انجماد، مشکلی برای ساخت محسوب نمی‌شود. در حقیقت یکی از موضوعات حل نشده در خصوص تولید نانوکامپوزیت‌ها با استفاده از روش‌های مذکور، مکانیزم در بر گرفته شدن نانوذرات توسط جبهه انجماد در سرعت‌های انجماد بسیار کمتر از سرعت‌های انجماد مورد نیاز برای دربرگرفته شدن ذرات میکرونی توسط جبهه انجماد است. بنابراین می‌توان گفت که بیشتر فعالیت‌های صورت گرفته در رابطه با ساخت نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی با کمک این نوع روش‌ها بر روی مرحله اول متمرکز شده است. از جمله

این روش‌ها می‌توان به روش حباب‌سازی مافوق صوت و روش ریخته‌گری گردابی اشاره کرد.

روش حباب‌سازی مافوق صوت قابلیت فوق‌العاده‌ای در تولید نانوکامپوزیت‌های ریختگی زمینه آلومینیوم و منیزیم دارد، اما با بررسی ریزساختار این نانوکامپوزیت‌ها مشاهده شده است که هنوز خوشه‌ها و کلوخه‌های نانوذرات در زمینه حضور دارند. استفاده از توان‌های بالا و زمان‌های طولانی بر روی مخلوط مذاب - نانوذرات که موجب آلوده شدن مذاب توسط ماده به کار رفته در ساخت پروب، کاهش عمر پروب و مصرف انرژی بالا در این روش شده و همچنین کاهش اثرات غیرخطی امواج مافوق صوت در مذاب با دور شدن از نوک پروب که باعث مشکلات بسیاری در افزایش مقیاس شده را می‌توان از معایب این روش بیان کرد [۴-۶].

در روش ریخته‌گری گردابی، با توجه به عدم توانایی این روش در شکستن کلوخه‌ها و خوشه‌های موجود در پودر خام نانوذرات، محققین برای ساخت مخلوط مناسب مذاب - نانوذرات، از روش‌ها و راهکارهایی نظیر بهبود ترشوندگی نانوذرات توسط مذاب از طریق افزودن عناصر فعال به مذاب، ایجاد پوشش مناسب بر روی سطح نانوذرات [۱۰]، شکستن کلوخه‌ها از طریق افزودن نانوذرات به مذاب خمیری [۱۱] و اختلاط تحت فشار پودر نانوذرات خام با پودر یک فلز نرم [۳]، [۸] و [۹] استفاده کرده‌اند.

در خصوص ریخته‌گری گردابی اصلاح شده که کارایی آن برای ساخت نانوکامپوزیت‌های پایه منیزیم و آلومینیوم به اثبات رسیده، به دلیل انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به سایر روش‌های مبتنی بر ریخته‌گری گردابی از اهمیت بالا برخوردار است. در این روش می‌توان در مخلوط پودر از عناصر فعال استفاده کرد و از این طریق ترشوندگی نانوذرات توسط مذاب را بهبود بخشید و با افزودن مخلوط پودر به مذاب کامل و با استفاده از عمل همزدن می‌توان به ماده نانوکامپوزیت دست یافت. مانند بقیه روش‌ها، در این روش نیز حذف کامل خوشه‌های نانوذرات تاکنون گزارش نشده است [۳]، [۸] و [۹].

تحقیقات انجام شده در این زمینه محدود است. در ادامه چند نمونه از آخرین تحقیقاتی که در این موضوع انجام شده مورد بررسی قرار می‌گیرند. هریستا و همکاران اثر افزودن  $Al_2O_3$  بر ویژگی‌های کامپوزیت‌های تقویت شده  $A356$  را بررسی کردند [۱۲]. آنها سعی داشتند با افزودن  $Al_2O_3$  به عنوان تقویت‌کننده با کسر حجمی‌های متفاوت از ۲ تا ۱۵ درصد و با استفاده از روش ریخته‌گری گردابی، مقدار بهینه افزودنی  $Al_2O_3$  جهت تقویت و بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت را تعیین کنند. آنها در نهایت نتوانستند مقدار افزودنی مناسب برای افزایش سختی کامپوزیت را بدست آورند.

حداد و همکاران [۱۳] با توجه به ویژگی‌های ذرات کربنی، از نانوصفحه‌های گرافن و نانولوله‌های کربنی به عنوان ذرات تقویت‌کننده با درصد‌های وزنی ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ در آلیاژ اولیه  $A356$  استفاده کردند. آنها از همزن گرافیتی با سرعت دورانی ۵۰۰ دور در دقیقه، در حالت پیوسته در دمای ۷۴۰ درجه سلسیوس به مدت ۱ دقیقه استفاده کردند. آنها گزارش کردند که استحکام کششی و فشاری در نتیجه افزایش مقادیر تقویت‌کننده افزایش می‌یابد. حداکثر افزایش ۲۸ و ۵۵ درصد به ترتیب برای مقاومت کششی و فشاری با استفاده از ۰/۱ درصد وزنی گرافن گزارش شد. همچنین نانولوله کربنی با ۰/۱ درصد وزنی

روش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۷]. این پارامترها شامل نوع همزن، ویژگی‌های هندسی همزن نظیر تعداد تیغه‌های پره همزن، قطر پره، عرض پره، زاویه تیغه پره نسبت به محور همزن، سرعت همزدن، جهت چرخش همزن، موقعیت قرارگیری پره همزن نسبت به کف ظرف یا بوته، زمان همزدن و حضور موج‌گیر در ظرف می‌باشند. گروه دوم، پارامترهای مربوط به مواد که شامل ترکیب آلیاژ، دمای مذاب، حالت مذاب، نوع، اندازه، شکل و درصد وزنی ذرات تقویت‌کننده، عملیات گرمائی انجام شده بر روی تقویت‌کننده قبل از افزودن آنها به مذاب، جنس قالب و عملیات گرمائی انجام شده بر روی قالب و اتمسفر کوره است. این پارامترها بر روی گرانروی مخلوط مذاب و ذرات، ترشوندگی ذرات توسط مذاب، نحوه انجماد کامپوزیت، واکنش شیمیائی ذرات با مذاب و ... تأثیر گذار می‌باشند [۱۸].

با توجه به اینکه هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی تأثیر نانوذرات بر خواص نانوکامپوزیت‌های ریختگی زمینه آلومینیوم است، بنابراین قبل از هر چیز بایستی از عوامل تأثیرگذار بر نحوه توزیع نانوذرات در این روش اطلاع داشت.

از مهمترین پارامترهای این روش سرعت همزدن، سرعت سردشدن، درصد نانوذره، دمای مذاب و نحوه افزودن نانوذرات به مذاب است. در این تحقیق سرعت هم زدن یک مقدار ثابت، ۷۵۰ دور بر دقیقه، انتخاب شده است. برای تغییر سرعت سرد شدن به این صورت عمل شده که دو قالب گرافیتی مجزا تهیه گردیده که یکی تا دمای ۲۰۰ درجه گرم شده و دیگری در دمای محیط باقی می‌ماند و سپس مذاب در هر دو قالب ریخته می‌شود. همچنین از نانوذرات با سه درصد مختلف، ۱/۵ و ۱۰/۵ درصد، استفاده شده است. دمای مذاب روی ۸۲۰ درجه سلسیوس ثابت می‌باشد. برای اضافه کردن نانوذرات ابتدا آمیزانی از نانوذرات و منیزیم تهیه شده و نانوذرات از طریق پودرهای آمیزان به مذاب افزوده شده‌اند. برای بررسی موثر بودن روش مذکور در تلقیح نانوذرات به مذاب و همچنین بررسی میزان بهبود خواص، از آزمون‌های سختی‌سنجی و کشش استفاده می‌شود. این بررسی‌ها برای نانوکامپوزیت‌های مختلف و آلیاژ زمینه در حالت ریختگی صورت گرفته است.

### ۳- ترکیب و نحوه ساخت نانوکامپوزیت

در این تحقیق، آلیاژ A357 با ترکیب عنصری مشخص شده در جدول ۱ به عنوان زمینه نانوکامپوزیت انتخاب شده است. این ماده از جمله آلیاژهای ریختگی Al-Si است که در صنایع نظامی، هوافضا و خودروسازی کاربرد فراوان دارد.

جدول ۱- ترکیب عنصری آلیاژ زمینه، A357

Mg	Si	Ti	Be	Al
۰/۶۰	۷/۰۰	۰/۱۵	۰/۰۰۵	۹۲/۲۵

همچنین در این پژوهش از نانو ذره رس ( NanoClay ) (Montmorillonite K10) با سه درصد وزنی مختلف به عنوان تقویت کننده استفاده شده است.

همان‌طور که قبلاً نیز به آن اشاره شد، برای تزریق ابتدا مخلوطی از نانوذرات و یک پودر فلزی تهیه و سپس مخلوط حاصل به مذاب افزوده می‌شود. در اینجا از یک نوع مخلوط پودری یا آمیزان استفاده

منجر به افزایش سختی نانوکامپوزیت به میزان ۳۳ درصد نسبت به آلیاژ بدون تقویت کننده شد.

پراکاش و مانیماران [۱۴] به بررسی اثرات افزودن کاربید سیلیکون (SiC) به آلیاژ Al6061 پرداختند. کامپوزیت‌ها با فرآیند ریخته‌گری گردابی و با افزودن ۳، ۵ و ۷ درصد وزنی SiC ساخته شدند. کامپوزیت‌های ساخته شده با آزمایش‌های مورفولوژیکی و مکانیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. از نتایج بدست آمده مشخص شد که افزودن SiC به میزان ۷ درصد وزنی باعث بهبود خواص می‌شود.

لاکشمناان و آمیت [۱۵] خواص سایشی نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی آلیاژی Al-Mg-Si تقویت‌شده با ۰/۵ و ۱/۵ درصد حجمی نانو ذرات SiCp ساخته‌شده با روش ریخته‌گری به کمک فراصوت را مورد مطالعه قرار دادند. آنها رفتار سایشی لغزشی خشک نانوکامپوزیت‌ها با تغییر بار نرمال، فاصله لغزش، سرعت لغزش و کسر حجمی نانو SiCp را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که نرخ سایش نانوکامپوزیت‌ها به شدت کمتر از آلیاژ تقویت نشده بود و نرخ سایش با افزایش محتوای تقویت کننده در زمینه فلزی کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که افزایش بار اعمال شده، سرعت لغزش و فاصله لغزش، نرخ سایش نانوکامپوزیت‌ها و آلیاژ یکپارچه را افزایش می‌دهد.

قلی پور و همکاران [۱۶] کامپوزیت زمینه آلومینیوم حاوی ذرات تقویت کننده نانورس مونت موریلونایت را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از روش متالورژی پودر و فرآیند اکستروژن برای تولید نمونه‌های نانوکامپوزیت حاوی ۱، ۲، ۴، ۶ و ۱۰ درصد نانورس استفاده شد. ارزیابی ریزساختاری با استفاده از میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی و بررسی فاز با استفاده از روش‌های پراش اشعه X و طیف سنج اشعه X انجام شد. در این تحقیق همچنین ارزیابی‌های مکانیکی شامل آزمون‌های سختی ماکرو و میکرو، ارزیابی چگالی، کشش و فشار نیز انجام شد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که افزودن نانورس مونت موریلونایت باعث بهبود خواص مکانیکی می‌شود.

هدف پژوهش حاضر بررسی تأثیر نانوذرات رس بر خواص نانوکامپوزیت‌های ریختگی زمینه آلومینیوم "A357" است. به همین منظور نانوذرات رس با درصد وزنی‌های ۱/۵ و ۱۰/۵ درصد تحت شرایط مختلف نظیر سرعت‌های متفاوت سرد شدن مذاب و حالات مختلف آلیاژ، ساخته شده و خواص سختی، استحکام کششی، استحکام تسلیم، تغییر طول در هنگام تسلیم، تغییر طول در هنگام شکست، مدول یانگ، چقرمگی شکست و کارسختی مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- روش ریخته‌گری گردابی اصلاح شده

در فرآیند ریخته‌گری گردابی پارامترهای بسیاری وجود دارند که بر روی توزیع و پخش ذرات تقویت‌کننده در مذاب آلیاژ تأثیرگذارند. گرچه توزیع نهائی ذرات تقویت‌کننده علاوه بر توزیع ذرات در مذاب به شرایط انجماد بستگی دارد ولی توزیع نامناسب ذرات در مذاب سبب بدتر شدن توزیع در قطعه پس از انجماد خواهد شد حتی اگر شرایط انجمادی در بهترین وضعیت باشد. بنابراین قبل از هر چیز باید به موضوع بهینه کردن پارامترهای این فرآیند پرداخته شود. به طور کلی این پارامترها را می‌توان به دو گروه تقسیم کرد. گروه اول، پارامترهای مربوط به همزن بوده که مورد توجه بسیاری از محققین است و به

می‌شود. آمیزان از پودر منیزیم و ۲۰ درصد وزنی نانوذره تشکیل شده است. برای ساخت آمیزان ابتدا پودرهای نانوذرات به میزان مورد نظر به ۲۵۰ سی سی الکل اتانول ۹۶ درصد اضافه شده و مخلوط به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه فراصوت قرار داده می‌شود. سپس پودر منیزیم به اندازه مورد نظر کم کم به مخلوط اضافه شده و به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه فراصوت قرار می‌گیرد. در نهایت مخلوط بدست آمده به مدت ۱ ساعت در دستگاه فراصوت قرار داده می‌شود. برای تهیه آمیزان از دستگاه آسیاب پر انرژی Attritor استفاده شده است. دستگاه اولتراسونیک و آسیاب در شکل ۱ نشان داده شده اند. آسیابکاری در سرعت ۴۴۸ دور بر دقیقه با فرکانس ۱۶ هرتز، در دمای ۷- درجه سلسیوس و مدت زمان ۹۰ دقیقه انجام گرفته است. نسبت وزنی گلوله‌ها به پودر ۲۰ و وزن پودر ۵۰ گرم در نظر گرفته شده است. آسیابکاری در حالی که محفظه آسیاب توسط جریان مداوم آب خنک می‌شود، صورت گرفته است. پس از اتمام این مرحله، مخلوط حاصل در آون و در دمای ۶۵ درجه به مدت ۵ روز قرار گرفته تا تمام الکل موجود در آن خشک شده و سپس پودر آمیزان تهیه گردد.

نظر گرفتن عدم تلفات آلیاژ و نانوذرات باید تأمین گردد:

$$W_t = W_{mp} + W_{alloy} \quad (1)$$

$$b = W_{Clay} / W_t \quad (2)$$

در روابط فوق،  $W_t$ ،  $W_{mp}$ ،  $W_{alloy}$  و  $W_{Clay}$  به ترتیب وزن کل نانوکامپوزیت، وزن پودر آمیزان، وزن آلیاژ و وزن نانوذرات رس است. با استفاده از رابطه بین  $W_{Clay}$  و  $W_{mp}$  که به صورت  $W_{Clay} = a W_{mp}$  است و حل همزمان روابط (۱) و (۲) رابطه‌ای به صورت زیر برای محاسبه وزن پودر آمیزان حاصل خواهد شد:

$$W_{mp} = bW_{alloy} / (a-b) \quad (3)$$

برای هر مرحله ساخت نانوکامپوزیت شامل نانو ذره رس و یک درصد معین ۲۵۰ گرم شمش آلومینیوم A357 انتخاب کرده و در بوته گرافیتی قرار داده تا در کوره ذوب شود. در این تحقیق از کوره مقاومتی که از بالا و به صورت عمودی بارگذاری می‌شود، برای ذوب شمش ریختگی و تهیه مخلوط نانوذرات و مذاب استفاده شده است. در شکل ۲ نمایی از کوره‌های مقاومتی استفاده شده نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲- (الف) کوره مقاومت الکتریکی و (ب) بوته گرافیتی مورد استفاده

ابتدا آلومینیوم تا دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس گرما داده می‌شود تا ذوب کامل شود و همه نقاط مذاب به یک ساختار مولکولی واحد برسند و سپس تا دمای ۶۲۰ درجه سلسیوس با گذشت زمان و کاهش گرمای کوره سرد می‌شود تا آلومینیوم به صورت نیمه جامد یا خمیری درآید. سپس آمیزان از طریق قیف تزریق و تحت گاز آرگون به مذاب اضافه



(الف)



(ب)

شکل ۱- (الف) آسیاب پر انرژی Attritor مورد استفاده در تهیه پودرهای آمیزان، (ب) دستگاه اولتراسونیک

برای ساخت نمونه نانوکامپوزیت ۵/۰ درصد وزنی ابتدا محاسبات مربوطه صورت گرفته است. فرض کنید کسر وزنی نانوذرات در نانوکامپوزیت ریختگی b و در پودر آمیزان a باشد. بنابراین برای ساخت نانوکامپوزیت، دو رابطه زیر که مبتنی بر قانون بقای جرم است با در

انجام گرفت. قطعات استوانه‌ای بزرگ که نمونه‌های اصلی هستند نیز از طریق تراشکاری و مطابق استاندارد ASTM A370 به فرم نمونه استاندارد برای آزمایش کشش مکانیکی درآمده و تحت آزمایش کشش قرار می‌گیرند.

#### ۴-۱- آزمایش کشش

برای بررسی خواص کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی و مقایسه آنها با خواص آلیاژ ریختگی از آزمایش کشش که توسط دستگاه آزمایشات، سرعت حرکت فک متحرک ۵ میلی متر بر دقیقه در نظر گرفته شد. نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM E8M-01 تهیه شدند (شکل ۳). برای هر نمونه ۵ مرتبه آزمایش کشش انجام گرفت. تعدادی از نمونه‌های آزمایش کشش در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. همچنین به منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نمونه‌های پولیش شده با محلول ۰/۵ درصد HF به مدت ۳۰ ثانیه اچ و در نهایت در الکل اتانول ۹۶٪ شسته شده‌اند. برای سهولت در ارائه نتایج از یک سیستم نام گذاری با حروف لاتین و مطابق با جدول ۲ استفاده شده است.

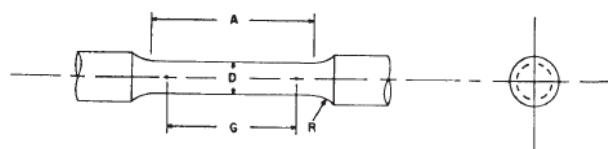
شده و با هم‌زن، دریل دیجیتالی با پره گرافیتی ۴ پره با زاویه ۴۵ درجه پادساعت گرد، به هم زده می‌شود این فرآیند بسته به درصد نانوذره تزریقی از ۲۰ دقیقه تا ۱ ساعت متغیر است. پس از اتمام تزریق پودر آمیزان، دما تا ۶۶۰ درجه سلسیوس که دمای ذوب آلومینیوم است بالا می‌آید و دوباره به هم زده می‌شود پس از آن دما را دوباره بالا برده و یک بار در ۷۵۰ درجه و یک بار در ۸۲۰ درجه سلسیوس آن را به هم زده و سپس مذاب در دو قالب گرافیتی مجزا، که یکی تا دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس پیش‌گرم شده و دیگری هم دما با محیط است، ریخته می‌شود. چند دقیقه پس از انجماد، قالب با دمای پایین را باز کرده و نمونه‌های ریخته‌گری شده در هوای محیط قرار می‌گیرد تا سرعت سرد شدن آن تقریباً ثابت بماند و به قالب پیش گرم شده اجازه داده می‌شود تا با نرخ سرد شدن طبیعی خود سرد شود و پس از آن نمونه خارج شده و از این طریق دو نمونه با سرعت‌های سرد شدن متفاوت ایجاد می‌گردد.

#### ۴- آماده‌سازی و نام گذاری نمونه‌ها

نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش سختی سنجی از انتهای استوانه‌های کوچک شکل گرفته در کنار نمونه اصلی با ارتفاع ۱ سانتی-متر بریده شد و پس از طی مراحل متالوگرافی استاندارد سطح آنها در چندین مرحله پولیش شده و سختی سنجی در مقیاس برینل روی آنها



(الف)



(ب)

D	R	G	A	طول نمونه	رزوه انتهای نمونه
$6 \pm 0.1$ mm	$\geq 6$ mm	$30 \pm 0.06$ mm	$\geq 36$ mm	$\geq 76.2$ mm	M10-1.25 mm

شکل ۳- الف) نمونه‌های آزمایش کشش ب) ابعاد نمونه آزمایش کشش

#### جدول ۲- کد های تعریف شده برای نمونه‌ها

کد	غلظت نانوذرات رس (درصد وزنی)	حالت مذاب آلیاژ در لحظه افزودن آمیزان	سرعت سرد شدن مذاب	کد	غلظت نانوذرات رس (درصد وزنی)	حالت مذاب آلیاژ در لحظه افزودن آمیزان	سرعت سرد شدن مذاب
PLH	صفر	مایع	زیاد	PLL	صفر	مایع	کم
AnsH	۰/۵	خمیری	زیاد	aNSL	۰/۵	خمیری	کم
bNSH	۱/۰	خمیری	زیاد	bNSL	۱/۰	خمیری	کم
CnsH	۱/۵	خمیری	زیاد	eNSL	۱/۵	خمیری	کم
aNLH	۰/۵	مایع	زیاد	aNLL	۰/۵	مایع	کم
bNLH	۱/۰	مایع	زیاد	bNLL	۱/۰	مایع	کم

cNLH	۱/۵	مایع	زیاد	cNLL	۱/۵	مایع	کم
PL: Pure alloy N: Nanocomposite S: Semi-solid state L: Liquid state							

در این نام گذاری حرف P مربوط به آلیاژ بدون نانوذره است. حرف N مربوط به نانوذره رس است. حرف S مربوط به حالت نیمه جامد برای آلیاژ در لحظه افزودن آمیزان است. حرف L مربوط به حالت مذاب برای آلیاژ در لحظه افزودن آمیزان است. حرف H مربوط به سرعت سرد شدن بالا برای مذاب و حرف L مربوط به سرعت سرد شدن پایین برای مذاب است.

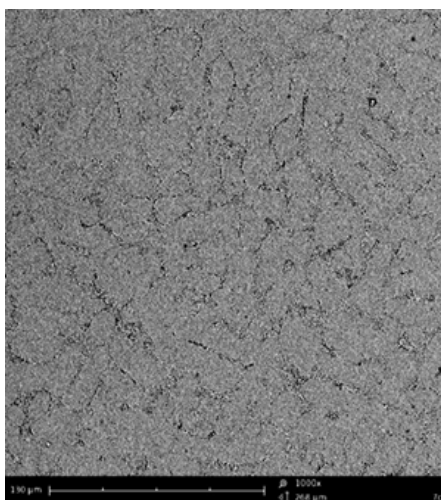
## ۵- تحلیل نتایج تجربی

شکل ۴ تصاویر SEM از آلیاژ A357 تقویت شده با ۱ درصد وزنی نانورس است که از طریق افزودن آمیزان به آلیاژ مذاب در حالت نیمه جامد و با سرعت سرد شدن پایین ریخته‌گری شده است. در تصاویر ریزتر شدن فاز یوتکتیک و همچنین حضور نانوذرات در دندریت‌ها و فاز یوتکتیک مشهود است. همچنین چنانچه در تصاویر دیده می‌شود فاز یوتکتیک در نانوکامپوزیت ۱ درصد نانورس در مقایسه با فاز یوتکتیک در آلیاژ خالص ریزتر است و همین امر می‌تواند دلیلی برای توجیه خواص مکانیکی بهتر نانوکامپوزیت نانورس باشد.

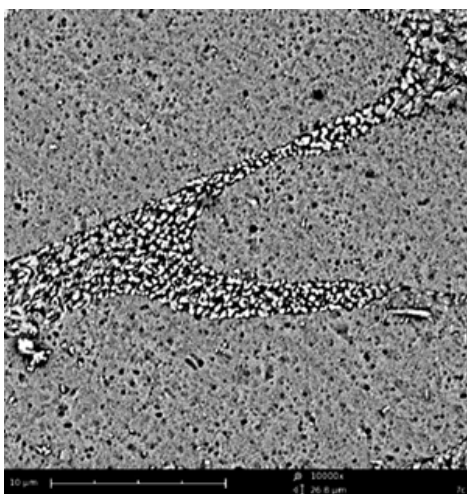
لازم به ذکر است وجود حفره‌های هوا و تخلخل در نانوکامپوزیت و حتی در آلیاژ پایه (که در تصاویر SEM ارائه شده مشخص است) موجب کاهش خواص مکانیکی می‌گردد. لذا در صورتی که بتوان تخلخل‌ها را حذف کرد و یا کاهش داد، می‌توان به خواص مکانیکی به مراتب بهتری دست یافت.

شکل ۵ نمودار سختی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم (A357) تقویت شده با نانوذرات رس نشان می‌دهد. برای هر سه حالت ۱، ۰/۵ و ۱/۵ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بهترین سختی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و همچنین بهترین سختی متعلق به نمونه شامل ۱/۵ درصد وزنی نانورس است.

برای هر سه حالت ۱، ۰/۵ و ۱/۵ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب همان طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، بیشترین استحکام تسلیم متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و همچنین بیشترین استحکام تسلیم متعلق به نمونه شامل ۱ درصد وزنی نانورس است.

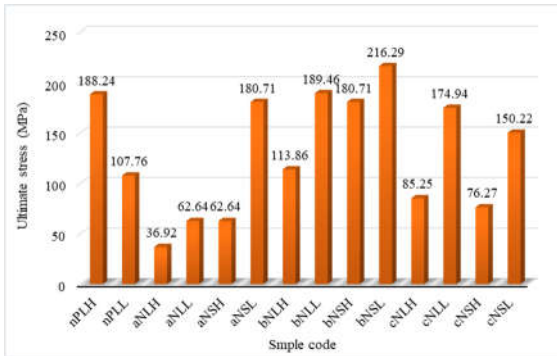


(الف)



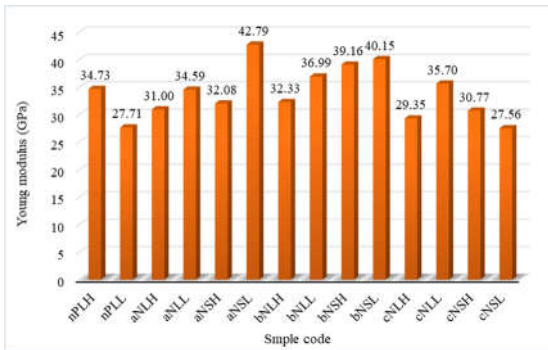
(ب)

با سرعت سرد شدن پایین و برای ۱/۵ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بیشترین استحکام کششی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ به پایه در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و همچنین بیشترین استحکام کششی نهایی متعلق به نمونه شامل ۱ درصد وزنی نانورس است.



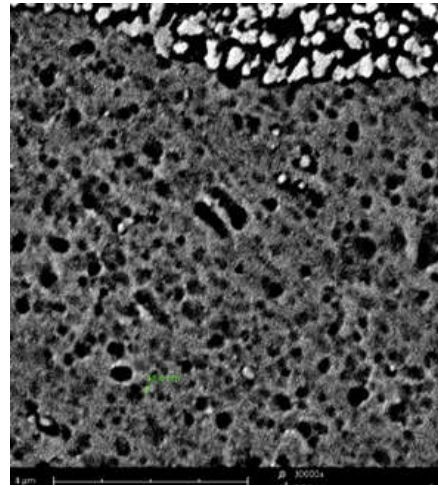
شکل ۷- تنش نهایی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات رس

مطابق با شکل ۸ برای حالت‌های ۱/۵ و ۱ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بیشترین مدول یانگ متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین و برای حالت ۱/۵ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بیشترین مدول یانگ متعلق به افزودن آمیزان در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت پایین است و همچنین بیشترین مدول یانگ متعلق به نمونه حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانورس است.



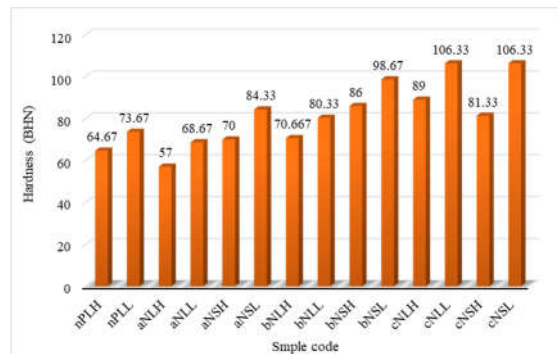
شکل ۸- مدول یانگ نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات رس

همان طور که از شکل ۹ برداشت می‌شود برای حالت ۱/۵ و ۱/۵ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام تسلیم متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین و برای ۱ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام تسلیم متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ به پایه در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است و همچنین بیشترین تغییر طول در نقطه استحکام تسلیم متعلق به نمونه حاوی

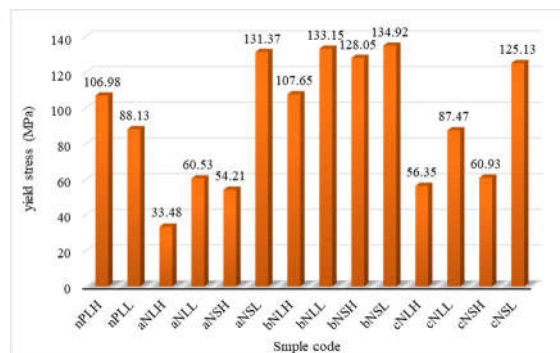


(پ)

شکل ۵- تصویر SEM از نانوکامپوزیت ۱ درصد نانورس بزرگنمایی‌های الف) ۱۰۰۰، ب) ۱۰۰۰۰، پ) ۳۰۰۰۰ برابر

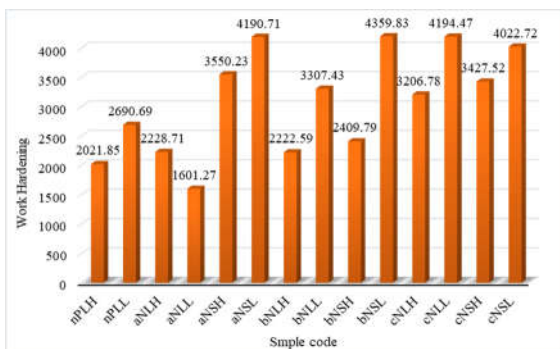


شکل ۶- سختی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات رس



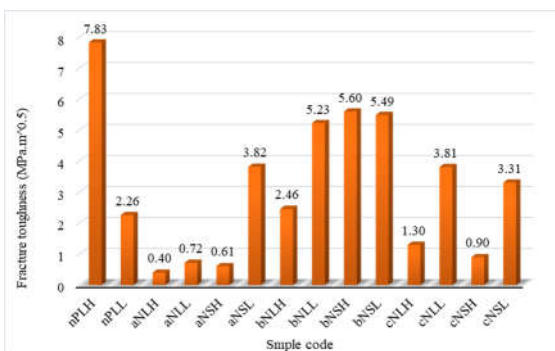
شکل ۶- تنش تسلیم نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات رس

شکل ۷- نمودار تنش نهایی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات رس را نشان می‌دهد. برای حالت‌های ۱/۵ و ۱ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بیشترین استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری



شکل ۱۱- کارسختی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات رس

شکل ۱۲ نمودار چقرمگی شکست نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات رس نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود چقرمگی از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. برای حالت ۰/۵ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بیشترین چقرمگی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است. برای حالت ۱ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن بالا و برای حالت ۱/۵ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر طول در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است. همچنین بیشترین چقرمگی متعلق به ۱ درصد وزنی است.



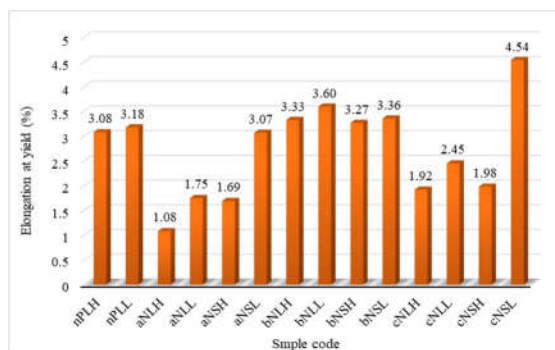
شکل ۱۲- چقرمگی شکست نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات رس

## ۶- نتیجه‌گیری

به طور کلی، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی به (۱) نوع نانوذرات، اندازه و نحوه توزیع آنها در ریزساختار زمینه فلزی، (۲) تأثیر نانوذرات روی اصلاح و ریزکردن فازهای مختلف و ریزکردن دانه‌ها و فاصله بین بازوهای دندردیتی ثانویه و همچنین (۳) تأثیر نانوذرات بر مقدار عیوب مختلف بستگی دارد.

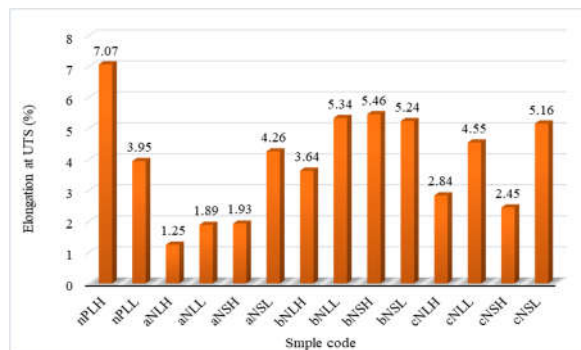
با افزایش غلظت نانوذرات در مخلوط مذاب - نانوذرات فاصله بین نانوذرات کاهش یافته و در نتیجه احتمال تشکیل خوشه‌های با اندازه و شکل‌های مختلف در مخلوط مذاب - نانوذرات و همچنین نانوکامپوزیت

۱/۵ درصد وزنی نانورس است.



شکل ۹- درصد تغییر طول به طول اولیه در نقطه تنش تسلیم نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات رس

همچنین مطابق با شکل ۱۰ مشاهده می‌شود برای حالت ۰/۵ و ۱/۵ درصد وزنی آلومینای اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت نیمه‌جامد و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین و برای حالت ۱ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بیشترین تغییر در طول در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت مذاب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن بالا است. همچنین بیشترین تغییر طول در نقطه استحکام کششی نهایی متعلق به نمونه شامل ۱ درصد وزنی نانورس است.



شکل ۱۰- درصد تغییر طول به طول اولیه در نقطه تنش نهایی نانوکامپوزیت زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات رس

در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود برای حالت ۰/۵ و ۱ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بیشترین کارسختی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ پایه در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین و برای ۱/۵ درصد وزنی نانورس اضافه شده به مذاب، بیشترین کارسختی متعلق به افزودن آمیزان به آلیاژ به پایه در حالت ذوب کامل و ریخته‌گری با سرعت سرد شدن پایین است.



- [2] Bakshi S. R., Lahiri D. and Agarwal A., Carbon nanotube reinforced metal matrix composites - a review, *International Materials Reviews*, Vol. 55, No. 1, pp. 41-64, 2010.
- [3] Sekunowo O. I., Durowaye S. I. and Lawal G. I., An Overview of Nano-Particles Effect on Mechanical Properties of Composites, *International Journal of Animal and Veterinary Sciences*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-7, 2015.
- [4] Rajabi M., Khodai M. M. and Askari N., Microwave-Assisted Sintering of Al-ZrO<sub>2</sub> Nano-Composites, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. Vol. 25, pp. 4577-4584, 2014.
- [5] De Cicco M., Konishi H., Cao G., Choi H. S., Turng L.-S., Perepezko J. H., Kou S., Lakes R. and Li X., Strong, Ductile Magnesium-Zinc Nanocomposites, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 40, No. 12, pp. 3038-3045, 2009.
- [6] Cao G., Konishi H., and Li X., Recent developments on ultrasonic cavitation based solidification processing of bulk magnesium nanocomposites, *Int. J. Met.* Vol. 2, No. 1, pp. 57-65, 2008.
- [7] Mazahery A., Abdizadeh H. and Baharvandi H. R., Development of high-performance A356/nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites, *Mater. Sci. Eng. A*. Vol. 518, No. (1-2), pp. 61-64, 2009.
- [8] Habibnejad-Korayem M., Mahmudi R., Ghasemi H. M. and Poole W. J., Tribological behavior of pure Mg and AZ31 magnesium alloy strengthened by Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-particles *Wear*, Vol. 268, No. (2-3), pp. 405-412, 2010.
- [9] Habibnejad-Korayem M., Mahmudi R. and Poole W. J., Enhanced properties of Mg-based nano-composites reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-particles, *Mater. Sci. Eng. A*. Vol. 519, No. (1-2), pp. 198-203, 2009.
- [10] Borgonovo C., Apelian D. and Makhlof M. M., Aluminum nanocomposites for elevated temperature applications, *Jom*. Vol. 63, No. 2, pp. 57-64, 2011.
- [11] Lee-Desautels R., Theory of van der Waals Forces as Applied to Particulate Materials, *Mater. Eng.* Vol. 27, No. 1-8, 2005.
- [12] Haritsa H., Akira M. W. and Zulfia A., The Role of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles on Mechanical Properties and Microstructure of Aluminum A356 Composites Produced by Stir Casting Method, *Materials Science Forum*. Vol. 1000, pp. 185-192, 2020.
- [13] Hadad M. j., Babazade A. and Safarabadi M., Investigation and comparison of the effect of graphene nanoplates and carbon nanotubes on the improvement of mechanical properties in the stir casting process of aluminum matrix nanocomposites, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 109, pp. 2535-2547, 2020.
- [14] Prakash B., Manimaran M., Investigations on mechanical properties of Al6061-SiC nanocomposites fabricated via stir casting process, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 39, pp. 22-25, 2021.
- [15] Lakshmanan P., Amith S. C., Investigation of tribological properties of Al-Mg-Si/SiCp nanocomposites prepared by ultrasonic assisted casting method, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 27, No. 2, pp. 1435-1442, 2020.
- [16] Gholipour V., Shamanian M., Ashraf A., Maleki A., Development of Aluminium-Nanoclay Composite by Using Powder Metallurgy and Hot Extrusion Process, *Metals and Materials International* Vol. 27, pp. 3681-3694, 2021.
- [17] Zhang Z., Chen D., Consideration of Orowan strengthening effect in particulate-reinforced metal matrix nanocomposites: A model for predicting their yield strength. *Scr. Mater.* Vol. 54, No. 7, pp. 1321-1326, 2006.
- [18] Sánchez Pérez J. A., Rodríguez Porcel E. M., Casas López J. L., Fernández Sevilla J. M., Chisti Y., Shear rate in stirred tank and bubble column bioreactors, *Chem. Eng. J.* Vol. 124, No. (1-3), pp. 1-5, 2006.

ریختگی افزایش می‌یابد. خوشه‌ای شدن نانوذرات سهم مکانیزم‌های استحکام بخشی اصلی (مکانیزم اورووان، مکانیزم افزایش چگالی نایجابی‌ها، مکانیزم انباشت نایجابی‌ها و مکانیزم اثر تحمل بار) در بهبود استحکام نانوکامپوزیت را به شدت کاهش می‌دهد. از طرفی افزایش غظت نانوذرات سبب افزایش لزجت مخلوط می‌شود که پیامد آن خروج سخت تر گازهای حل شده در مذاب آلیاژ و افزایش تخلخل‌های گازی و انقباضی در ساختار نانوکامپوزیت خواهد شد.

با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که نانوکامپوزیت‌های زمینه آلومینیوم در خواص مکانیکی به مراتب بهتر از آلیاژ پایه هستند. همچنین با بررسی نتایج بدست آمده از آزمون‌های مکانیکی مشخص شد هرچه درصد وزنی نانوذره افزوده شده به آلیاژ بیشتر باشد، اثر سختی‌زایی آن بر روی آلیاژ بیشتر بوده و موجب افزایش سختی می‌گردد که می‌تواند به دلیل اثر استحکام بخشی نانوذرات رس باشد.

افزودن نانوذرات رس به آلیاژ مذاب در حالت نیمه جامد بطور کلی موجب بهبود استحکام تسلیم و استحکام نهایی نانوکامپوزیت پایه آلومینیومی می‌گردد. نتایج ارائه شده در مرجع [۱۶] نیز موید این نکته است. همچنین ریخته‌گری این گونه از نانوکامپوزیت‌ها با سرعت سرد شدن پایین خواص بهتری را نسبت به ریخته‌گری با سرعت سرد شدن بالا بدست می‌دهد که هم می‌تواند به دلیل زمان بیشتر انجماد و در نتیجه خروج مقداری از گازها و فیلم‌های اکسیدی حبس شده در نانوکامپوزیت باشد و هم به دلیل جان‌شینی بهتر نانوذرات. همچنین با بررسی نتایج مشخص شده که در نمونه‌های دارای ۱ درصد وزنی نانوذره رس، بهترین بهبود خواص ایجاد شده و در ۱/۵ درصد وزنی، کاهش استحکام تسلیم و کاهش استحکام نهایی نسبت به ۱ درصد وزنی رخ می‌دهد که می‌تواند به دلیل خوشه‌ای شدن نانوذرات رس و مقاومت کم خوشه‌ها در مقابل تنش‌های مکانیکی باشد.

از بررسی نتایج تصویربرداری SEM مشخص می‌شود که حضور ذرات نانورس در ترکیب نانوکامپوزیت موجب می‌شود فاز یوتکتیک آلیاژ ریزتر شود و این خود می‌تواند یکی از دلایل بهبود خواص توسط نانورس باشد. عوامل دیگری که می‌تواند در این نتیجه موثر باشد شامل بهبود توزیع و پراکندگی نانوذرات در ساختار نانوکامپوزیت و کاهش پدیده خوشه‌ای شدن و کوچکتر شدن بازوهای دندریتی است. همچنین بهتر بودن خواص نانوکامپوزیت‌های تقویت شده با نانورس می‌تواند به دلیل خواص ذاتی نانورس مانند اختلاف ضریب انبساط بیشتر با آلیاژ پایه، ابعاد ذرات و ... باشد.

لازم به ذکر است عوامل بیرونی غیرقابل کنترل مانند زمان ریخته‌گری ذوب در قالب، نرخ دمش گاز آرگون و ... نیز بر روی نتایج موثر بوده است.

## ۷- تقدیر و تشکر

برخود لازم می‌دانیم از همکاران گرامی در پژوهشکده پوشش‌های نانو ساختار دانشگاه پیام نور یزد که با فراهم نمودن امکانات آزمایشگاهی کمک بزرگی به انجام این پژوهش نمودند، قدردانی نمایم

## ۸- مراجع

- [1] Casati R. and Vedani M., Metal Matrix Composites Reinforced by Nano-Particles—A Review, *Metals (Basel)*, Vol. 4, No. 1, pp. 65-83, 2014.